

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 212.125.08  
НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО  
ОБРАЗОВАНИЯ «МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)» (МАИ)  
МИНИСТЕРСТВА ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
(МИНОБРНАУКИ РФ) ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ  
СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_

решение диссертационного совета от 05.10.2015 г. № 23

О присуждении Семенову Александру Анатольевичу, гражданину Российской Федерации ученой степени кандидата технических наук.

Диссертация «Распыление керамик и керамических композитов потоками ионов низких энергий» по специальности 05.07.05 – Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов принята к защите 22 июня 2015 г., протокол № 11 диссертационным советом Д 212.125.08 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (МАИ) Министерства образования и науки Российской Федерации (Минобрнауки РФ), 125993, г.Москва, Волоколамское шоссе, д. 4, приказы Минобрнауки РФ: о создании диссертационного совета – № 2249-1460 от 02.11.2007 г., об изменении состава диссертационного совета – № 1986-540/1460 от 21.11.2008 г., о продлении срока действия диссертационного совета – № 1925-601 от 08.09.2009 г., о соответствии диссертационного совета Положению о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук – № 105/нк от 11.04.2012 г., об изменении состава диссертационного совета – № 508/нк от 22.08.2012 г., об изменении состава диссертационного совета – № 548/нк от 06.10.2014 г.

Соискатель Семенов Александр Анатольевич, 1959 года рождения, работает научным сотрудником в федеральном государственном бюджетном

образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (МАИ) Министерства образования и науки Российской Федерации (Минобрнауки РФ).

В 1982 году соискатель окончил Московский ордена Ленина и ордена Октябрьской революции авиационный институт имени С. Орджоникидзе Министерства высшего и специального среднего образования СССР. В 2015 году соискатель окончил заочную аспирантуру федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (МАИ) Министерства образования и науки Российской Федерации (Минобрнауки РФ).

Диссертация выполнена на кафедре «Авиационно-космическая теплотехника» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (МАИ) Министерства образования и науки Российской Федерации (Минобрнауки РФ).

**Научный руководитель** – кандидат технических наук Шкарбан Игорь Иванович, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (МАИ) Министерства образования и науки Российской Федерации (Минобрнауки РФ), кафедра «Авиационно-космическая теплотехника», профессор.

**Официальные оппоненты:**

- Бачурин Владимир Иванович, доктор физико-математических наук, доцент, Ярославский филиал ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет путей сообщения» (Ярославский филиал МИИТ), кафедра «Высшая и прикладная математика», профессор;

– Беграмбеков Леон Богданович, доктор физико-математических наук, профессор, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», кафедра «Физика плазмы», профессор

дали положительные отзывы на диссертацию.

**Ведущая организация** – ГНЦ ФГУП «Исследовательский центр имени М.В. Келдыша» (ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша») (г. Москва) в своем положительном заключении, подписанном Ловцовым Александром Сергеевичем, к.ф.-м.н., начальником отдела 120 ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша», Семенкиным Александром Вениаминовичем, д.т.н., начальником отделения 3 ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша», и утвержденным Губертовым Арнольдом Михайловичем, д.т.н., заместителем генерального директора по науке ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша», указала, что диссертационная работа Семенова Александра Анатольевича «Распыление керамик и керамических композитов потоками ионов низких энергий» является законченной научно-исследовательской работой. Актуальность темы подтверждена, материал диссертации логично изложен в соответствии с поставленной целью и задачами исследования. Результаты диссертационной работы значимы для развития электроракетных двигателей (ЭРД) и могут быть использованы при разработке и проектировании стационарных плазменных двигателей (СПД) в части оценки эрозионной стойкости и прогнозирования ресурса разрядных камер и ускорительных каналов. Диссертационная работа соответствует требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней ВАК РФ для диссертационных работ на соискание ученой степени кандидата наук, а автор диссертации Семенов Александр Анатольевич заслуживает присвоения степени кандидата технических наук по специальности 05.07.05 – Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов.

Соискатель имеет 31 опубликованную работу, в том числе: по теме диссертации – 14 общим объемом 5,26 печатных листов; работ, опубликованных в рецензируемых научных изданиях – 6; тезисов докладов на научных конференциях – 8; все работы опубликованы в соавторстве. В работах приводятся

результаты экспериментального исследования характеристик распыления керамических материалов при облучении их поверхности потоками ионов инертных газов. Исследованы характеристики распыления керамик и керамических композитов в зависимости от различных факторов и условий облучения; ряд закономерностей обнаружен впервые. Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

1. *С.В.Мадеев, А.А.Семенов, С.А.Хартов, И.И.Шкарбан.* Формирование «фрактальных» структур в межэлектродном зазоре в результате распыления электродов сеточных источников ионов. – Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2013, № 10, с. 26–31 (0,38 п.л.).
2. *Алексеевич М.Ю., Панков А.С., Сударев А.А., Семенов А.А.* Влияние состава композиционных керамик на их коэффициенты распыления. – Вестник ГКТУ им. А.Н. Туполева, Казань, 2013, № 2, С. 11-14 (658-661) (0,25 п.л.).
3. *А.А.Семенов, И.И.Шкарбан.* Влияние температуры поверхности на характеристики распыления керамик на основе нитрида бора. // Вестник Московского авиационного института – 2009, №1, с. 49 (0,50 п.л.).
4. *С.С.Еловигов, А.С.Мосунов, Ю.А.Рыжов, А.А.Семёнов, М.Ю.Толпина, А.Ю.Фельдман, И.И.Шкарбан, В.Е.Юрасова.* Угловые закономерности распыления нитрида бора и керамики на его основе при изменении температуры мишени. // Известия РАН. Сер.Физ. – 2006, Т.7, №8, С.1182-1188 (0,44 п.л.).
5. *Ю.А.Рыжов, А.А.Семенов, И.И.Шкарбан, А.С.Мосунов, В.Е.Юрасова.* Особенности распыления ионами низких энергий бинарных соединений и композиционных мишеней. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. «Термоядерный синтез» –М.:2004, Вып.2, С.54-65 (0,75 п.л.).
6. *С.С.Еловигов, Е.Ю.Зыкова, А.С.Мосунов, А.А.Семенов, И.И.Шкарбан, В.Е.Юрасова.* Зависимость распыления нитрида бора от энергии, массы и угла падения ионов. // Известия АН. Сер. Физическая. – 2002, Т.66, №4, С.558-561 (0,25 п.л.).
7. *Л.Н.Лесневский, Ю.А.Рыжов, А.А.Семенов, А.Е.Трошин, И.И.Шкарбан.* Распыление плазменных покрытий на основе керамик и интерметаллических соединений – Сб. трудов 21-й Международной конференции «Взаимодействие ионов с поверхностью» (ISI-2013), Ярославль, 22-26 августа 2013 г. – М.: Издательство «Телер», 2013, С. 174-176 (0,19 п.л.).
8. *Elvira Nikiporetz, Alexander Semenov, Igor Shkarban and Elena Khartova.* Sputtering progress of BN based ceramic by the flows of noncompensated charge plasma. // Proc. of the 30<sup>th</sup> International electric propulsion conference, Florence, Italy, September 17-20, 2007 – IEPC 2007-7 (0,35 п.л.).
9. *М.М.Горшков, Ю.А.Рыжов, А.А.Семенов, А.Ю.Фельдман, И.И.Шкарбан.* Влияние температуры мишени на угловые зависимости коэффициентов распыления керамик. // Сб. трудов 17-й Международной конф.

«Взаимодействие ионов с поверхностью» – Изд. МАИ, 2005, Т.1, С.111-113 (0,19 п.л.).

10. *А.А.Семенов, С.А.Ситников, А.Ю.Фельдман, И.И.Шкарбан.* Влияние концентрации нитрида бора на коэффициенты распыления композиционных керамических материалов. // Сб. трудов XVI Международной конференции «Взаимодействие ионов с поверхностью», Звенигород, 25-29 августа 2003 г. – М.: 2003, Т.1, С.180-181 (0,13 п.л.).
11. *Vladimir Kim, Vyacheslav Kozlov, Alexander Semenov and Igor Shkarban.* Investigation of the boron nitride based ceramics sputtering yield under its bombardment by Xe and Kr ions. // Proceedings of the 27<sup>th</sup> International Electric Propulsion Conference, IEPC-01-073 – Pasadena, California, USA. October 15-19, 2001 (1,20 п.л.).
12. *В.П.Ким, А.А.Семенов, А.Ю.Фельдман, И.И.Шкарбан.* Распыление керамик ионами Хе и Кр при энергиях 100-400 эВ. // Сб. трудов 15 Международной конференции «Взаимодействие ионов с поверхностью» – Москва, 2001, т.1, С.134-136 (0,19 п.л.).
13. *С.С.Еловигов, А.С.Мосунов, А.А.Семенов, И.И.Шкарбан, В.Е.Юрасова.* Энергетическая зависимость распыления поликристаллического нитрида бора. // Сб. трудов 15 Международной конференции «Взаимодействие ионов с поверхностью» – Москва, 2001, т.1, С.116-119 (0,25 п.л.).
14. *А.Н.Раннев, А.А.Семенов, О.Б.Соловьев.* Влияние температуры поверхности на скорость распыления керамики. // Сб. трудов 13 Международной конференции «Взаимодействие ионов с поверхностью» – Москва, 1997, т.1, С.136 (0,19 п.л.).

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

Отзыв на диссертацию ведущей организации ГНЦ ФГУП

«Исследовательский центр имени М.В. Келдыша», подписанный Ловцовым Александром Сергеевичем, к.ф.-м.н., начальником отдела 120, Семенкиным Александром Вениаминовичем, д.т.н., начальником отделения 3, утвержденный Губертовым Арнольдом Михайловичем, д.т.н., заместителем генерального директора по науке. В отзыве приведены следующие замечания:

1. В разделе 2.1 автор постулирует, что энергетическая зависимость коэффициента распыления в диапазоне энергий 80-1000 эВ близка к линейной. Однако, по опубликованным справочным данным (Atomic data and nuclear data tables, 62, 149-253 (1996), Article No. 0005) по распылению моноатомных мишеней ионами различных элементов (в том числе  $Ar^+$ ,  $Kr^+$ ,  $Xe^+$ ) в ряде случаев наблюдается существенное отклонение от линейности в указанном выше диапазоне. Линейную аппроксимацию при анализе энергетических



зависимостей коэффициента распыления стоит применять на более коротких энергетических промежутках, например, от 50 до 100 эВ, от 100 до 200 эВ, от 200 до 500 эВ, от 600 до 1000 эВ.

2. В разделе 2.4 автор указал, что провел расчет плотности ионного тока для обеспечения степени чистоты  $\theta_{\text{пр}} < 0,05$ . Однако сам расчет в работе не приведен, а также не указаны способ получения и значения коэффициента десорбции, как одного из важнейших параметров в расчетной формуле.
3. В разделе 3 отмечается, что применительно к СПД интересен диапазон энергий от десятков (20-30) эВ до нескольких сотен (500-700) эВ, однако этот диапазон не охватывается используемым в работе ионным источником (100-400 эВ). Стоит отметить, что использование в эксперименте ионного источника Кауфмана позволило бы исследовать диапазон высоких энергий (400-700 эВ), проведя весь спектр работ, начиная от обеспечения чистоты  $\theta_{\text{пр}} < 0,1$  при плотностях тока  $\sim 5 \text{ мА/см}^2$  при давлении  $5 \cdot 10^{-5} - 1 \cdot 10^{-4}$  Торр, до определения дозовой зависимости.
4. В работе подчеркиваются особенности распыления пористых материалов, однако отсутствуют оценки пористости композитных керамик и её влияние на микрорельеф распыляемой поверхности и коэффициент распыления.

Отзыв на диссертацию официального оппонента Бачурина Владимира Ивановича, доктора физико-математических наук, доцента, профессора кафедры «Высшая и прикладная математика» Ярославского филиала ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет путей сообщения» (ЯФ МИИТ).  
Замечания по диссертационной работе:

1. В работе исследуется распыления диэлектрических материалов, однако эффекты, связанные с зарядкой поверхности, не обсуждаются.
2. Поскольку представленные результаты являются экспериментальными, хотелось бы видеть погрешности измерений, которые присутствуют только на рис. 36 на стр. 77 в диссертации и на рис. 13 на стр. 16 в автореферате. В тексте работы обсуждаются и даже измеряются возможные источники погрешностей (стр. 84-86), однако никаких оценок не приведено.

3. Из текста диссертации не понятно, каким образом измерены концентрации элементов на поверхности композитов (рис. 37, стр. 80). Получены ли эти данные автором или приведены из литературных источников?
4. На мой взгляд, автор не совсем корректен в некоторых терминах. Например, плазмообразующий газ в ионном источнике называется рабочим телом. Однокомпонентный материал является материалом, состоящим из одной компоненты, в то время как в тексте диссертации и автореферате такими называются керамики нитрид бора, диоксид и нитрид кремния и другие двухкомпонентные вещества.
5. Не совсем убедительными представляются предложенные автором объяснения ряда впервые обнаруженных эффектов. В частности, значительного различия коэффициентов распыления композитных керамик, содержащих нитрид бора и диоксид и нитрид кремния (рис. 36). Однако интерпретация таких результатов прерогатива, скорее, физиков. Выяснение причин таких эффектов требует дополнительных исследований с привлечением большого числа методов анализа поверхности и может стать темой новой отдельной исследовательской работы.

Отзыв на диссертацию официального оппонента Беграмбекова Леона Богдановича, доктора физико-математических наук, профессора, профессора кафедры «Физика плазмы» Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ». Замечания по работе:

1. Схема источника ионов, представленная на рисунке 7, не соответствует описанию источника, дающегося в соответствии с этим рисунком. В частности, магнитная система, устроенная так, как это показано на рисунке, создает в источнике ионов продольное магнитное поле и не создает её поперечную составляющую, которая совместно с продольным электрическим полем должна обеспечивать горение разряда источника.
2. При перечислении механизмов распыления (раздел 1.2, стр. 15), автор не упоминает ионно-стимулированную десорбцию. Этот механизм активен

именно на диэлектрических поверхностях и, по-видимому, мог играть значительную роль в распылении керамических материалов.

3. На этой же странице ошибочно упоминается вторичная электронная эмиссия, вместо ионно-электронной эмиссии (ИЭЭ) в качестве процесса, сопровождающего ионную бомбардировку поверхности. ИЭЭ пренебрежимо мала при облучении ионами низких энергий диэлектриков, но при облучении большими дозами некоторые из исследованных керамик ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{AlN}$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ,  $\text{Si}_{4,5}\text{Al}_{1,5}\text{O}_{1,5}\text{N}$ ) становятся проводящими, и ИЭЭ может давать вклад в измерении электрического заряда, пришедшего на образец.
4. Предположение о восстановлении состава нитрида бора при распылении  $\text{BN}+\text{Si}_3\text{N}_4$  не может объяснить резкое уменьшение его распыления при концентрации  $\text{BN}$  выше примерно 20%, даже в предположении полного прекращения распыления. Результаты эксперимента могут объясняться уменьшением коэффициента распыления с большей концентрацией, то есть  $\text{Si}_3\text{N}_4$ . А это указывает на то, что именно атомы бора перенасылялись на поверхность  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , приводя к формированию слоя  $\text{BN}$  на зернах  $\text{Si}_3\text{N}_4$  и, следовательно, к замедлению их распыления.

Все отзывы, поступившие на автореферат, положительные.

Отзыв на автореферат Ходненко Владимира Павловича, доктора технических наук, профессора, главного научного сотрудника АО «Корпорация ВНИИЭМ» содержит следующие замечания по содержанию работы:

- В главе 3 автор рассматривает влияние энергии на угловые зависимости коэффициента распыления на примере только одного материала – нитрида кремния. Было бы полезно представить данные и для других материалов, исследуемых в работе.

Отзыв на автореферат Твердохлебовой Екатерины Михайловны, кандидатом технических наук, и.о. начальника Управления ФГУП «ЦНИИМаш» и Гусева Юрия Геннадьевича, начальника отдела ФГУП «ЦНИИМаш» содержит следующие замечания по содержанию работы:



- Ориентируя свою работу на проблему ресурса СПД, автор приводит сравнение своих результатов с данными других исследователей, полученными на модельных мишенях, однако не приводит сравнение с результатами испытаний двигателей. Вместе с тем, данные таких испытаний существуют, и они согласуются с полученными в работе результатами. Сравнение с реальной двигательной практикой было бы гораздо интереснее и важнее, но она, к сожалению, в работе отсутствует.

Отзыв на автореферат Мартыненко Юрия Владимировича, доктора физико-математических наук, главного научного сотрудника НИЦ «Курчатовский институт», не содержит замечаний по содержанию работы.

Отзыв на автореферат Титова Андрея Ивановича, доктора физико-математических наук, профессора, профессора кафедры «Физическая электроника» Санкт-Петербургского политехнического университета имени Петра Великого содержит следующие замечания по содержанию работы:

- В качестве недостатка работы можно отметить отсутствие анализа изменений топографии и элементного состава поверхности, которые имеют место в результате ионного облучения. Хотя для решаемых автором прикладных задач изменения на микро-уровне, скорее всего, не имеют особого значения – эрозия рабочих поверхностей СПД даже не на пределе их ресурса имеет существенно большие масштабы. Однако с точки зрения физики распыления многокомпонентных материалов такой анализ был бы интересен и, возможно, прояснил бы ряд моментов, не объясненных автором в работе – например, наличие дозовой зависимости коэффициента распыления в начальный момент облучения.

Отзыв на автореферат Зиновьева Александра Николаевича, доктора физико-математических наук, заведующего лабораторией ФГБУН «Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе» Российской академии наук содержит следующие замечания по содержанию работы:

- Автор, изучая энергетические зависимости коэффициента распыления, ограничивает исследования диапазоном энергий от 100 до 400 эВ. На мой

взгляд, следовало бы расширить диапазон энергий до 700-1000 эВ – учитывая тенденцию к повышению энергетики стационарных плазменных двигателей.

Выбор официальных оппонентов обосновывается их компетентностью в отрасли науки, к которой относится диссертационная работа (в области физики взаимодействия ионов и плазмы с поверхностью твердых тел), а также наличием публикаций по тематике исследования. Ведущая организация выбрана в соответствии с её широко известными достижениями в области разработки ракетно-космической техники, способностью определить научную и практическую ценность диссертации.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

- **разработана** методика экспериментального исследования интегральных характеристик ионного распыления материалов сложного состава, учитывающая полиэнергетичность ионного потока, особенности поведения диэлектрических пористых структур в условиях вакуума и воздействия высоких температур, зависимость характеристик распыления от дозы облучения, а также динамику десорбционных процессов на облучаемой поверхности;
- **доказана** возможность применения разработанной методики для исследования ионно-эрозионной стойкости конструкционных керамических материалов, предназначенных для разрядных камер и ускорительных каналов СПД.

Теоретическая значимость исследований обоснована тем, что:

- **использованы:**
  - весовой метод определения коэффициентов распыления,
  - методы радиочастотной масс-спектрометрии и электростатического энергоанализа;

– **изложены:**

- основные положения существующих теорий ионного распыления твердых тел,
- гипотеза, объясняющая резкое снижение коэффициента распыления керамических композитов при увеличении концентрации азота в составе материала;

– **изучены:**

- зависимости коэффициентов распыления керамических материалов различного состава от энергии и угла падения бомбардирующих ионов,
- зависимость интегрального коэффициента распыления керамических композитов от концентрации компонентов,
- влияние температуры облучаемой поверхности на коэффициент распыления и характер его угловой зависимости.

Значение полученных соискателем результатов для практики подтверждается тем, что:

– **разработана и внедрена** база данных по ионному распылению конструкционных керамических материалов, предназначенных для разрядных камер и ускорительных каналов СПД (используется в ОКБ «Факел», НИИПМЭ);

– **определены** перспективы использования полученных результатов при разработке стационарных плазменных двигателей и ионных ускорителей иного назначения;

– **представлены** рекомендации по использованию керамических материалов в конструкции разрядных камер и ускорительных каналов СПД.

Оценка достоверности полученных результатов выявила:

– **для экспериментальных работ**

- результаты получены на аттестованном оборудовании,
- показана воспроизводимость результатов исследования в различных условиях;

- **использовано** сравнение авторских данных с данными, полученными ранее другими авторами по рассматриваемой тематике;
- **установлено** качественное и количественное совпадение результатов, полученных автором, с известными апробированными результатами, представленными в независимых источниках по данной тематике, а также с результатами длительных испытаний СПД;
- **использованы** современные методы сбора и обработки исходной информации.

Личный вклад соискателя состоит в:

- разработке методики определения характеристик ионного распыления диэлектрических материалов сложного состава, имеющих фрагментированную пористую структуру;
- подготовке и проведении экспериментов;
- обработке и интерпретации экспериментальных данных;
- подготовке основных публикаций по выполненной работе.

На заседании 05 октября 2015 г. диссертационный совет принял решение присудить Семенову А.А. ученую степень кандидата технических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 19 человек, из них 7 докторов наук по специальности 05.07.05 – Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов, участвовавших в заседании, из 28 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за – 19 человек, против – нет, недействительных бюллетеней – нет.

Председатель совета  
д.т.н., профессор



Равикович Юрий Александрович

Ученый секретарь совета,  
д.т.н., профессор



Зуев Юрий Владимирович